

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ana Beatriz Esteves Teixeira**

**Metodologia para Avaliação Probabilística  
de Reservas de Óleo e Gás**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Silvio Hamacher

Rio de Janeiro  
Junho de 2011

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ana Beatriz Esteves Teixeira**

## **Metodologia para Avaliação Probabilística de Reservas de Óleo e Gás**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sílvio Hamacher**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Dr. Daniel Nunes de Miranda Filho**

Petrobras

**Prof. Leonardo Junqueira Lustosa**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de junho de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

## Ana Beatriz Esteves Teixeira

Graduou-se em Engenharia de Produção na PUC-Rio em 2004. Trabalhou como analista de logística na Variglog de 2004 a 2005 e como supervisora de vendas na Procter & Gamble de 2005 a 2008.

### Ficha Catalográfica

Teixeira, Ana Beatriz Esteves

Metodologia para avaliação probabilística de reservas de óleo e gás / Ana Beatriz Esteves Teixeira ; orientador: Silvio Hamacher. – 2011.

102 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Estimação de reservas. 3. Avaliação econômica. 4. Agregação probabilística. 5. Correlações. 6. Petróleo. I. Hamacher, Silvio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## **Agradecimentos**

Gostaria de registrar meus agradecimentos:

Ao professor Silvio Hamacher, orientador da dissertação, pela constante participação e apoio em todas as fases deste trabalho;

Ao Leonardo Junqueira Lustosa, ao Daniel Nunes de Miranda Filho e ao Juan Antonio Molina pela pronta disposição de participar da banca examinadora;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida;

À Livia Hastenreiter de Araújo, ao Maurício Galvão e ao Jorge Montechiari pelas contribuições ao trabalho;

À minha família pelo apoio em todos os momentos.

## Resumo

Teixeira, Ana Beatriz Esteves; Hamacher, Silvio (Orientador). **Metodologia para Avaliação Probabilística de Reservas de Óleo e Gás.** Rio de Janeiro, 2011. 102p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais fatores para avaliação do valor de uma companhia de petróleo é a sua quantidade de reservas de óleo e gás declaradas. Porém, a estimação de reservas mostra-se um procedimento de grande complexidade, dada a incerteza associada aos volumes, à recuperação, ao desenvolvimento e à comercialidade dos recursos. A abordagem probabilística permite que estas incertezas sejam consideradas na avaliação de reservas de cada projeto. Os projetos, por sua vez, são agregados para a obtenção das reservas consolidadas da companhia. A agregação quando conduzida de forma probabilística gera o chamado efeito portfólio, que representa a redução do desvio-padrão da distribuição agregada de reservas. No contexto da avaliação de reservas, o efeito portfólio pode gerar um aparente aumento nas reservas provadas agregadas. Contudo, diferentes projetos podem compartilhar riscos e por isso a determinação das correlações entre eles é um fator chave para a estimação mais precisa das reservas. Este trabalho propõe apresentar uma metodologia para a avaliação probabilística de reservas baseada em correlações e em acordo com as orientações do SPE-PRMS (2007) e as regras da Securities Exchange Commission (SEC-2009). A metodologia se dividiu em duas etapas principais: avaliação econômica considerando incertezas nos componentes do fluxo de caixa e agregação probabilística utilizando parcialmente o método AHP para a determinação das correlações entre projetos. Foi criado um sistema para implementação da metodologia e realização de um estudo de caso com dados reais. Os resultados numéricos comprovaram a necessidade da identificação das correlações entre projetos e os impactos do efeito portfólio na agregação probabilística.

## Palavras-chave

Estimação de reservas; avaliação econômica; agregação probabilística; correlações; petróleo.

## Abstract

Teixeira, Ana Beatriz Esteves; Hamacher, Silvio (Advisor). **Probabilistic Oil and Gas Reserves Assessment Methodology**. Rio de Janeiro, 2011. 102p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The estimation of petroleum reserves entails complex assumptions and calculations, once there is uncertainty associated with volumes, recovery, development and marketability of resources. These uncertainties can be taken into account when a probabilistic approach is employed for the reserves evaluation of each project. Projects are then aggregated to obtain company's consolidated reserves. The aggregation when conducted probabilistically generates what is known as "portfolio effect", which represents the reduction in the standard deviation of the distribution of aggregate reserves. In the context of reserves evaluation, the portfolio effect can increase consolidated proved reserves. However, different exploitation projects may share similar or the same risks, hence the correlation among them is a key factor for estimating more accurately the aggregated reserves. This study proposes a correlation-based methodology for estimating oil reserves probabilistically and is in accordance with the guidelines of the SPE-PRMS (2007) and the Securities Exchange Commission (SEC-2009). The methodology was presented in two major steps: economic assessment considering uncertainty in cash-flow components and probabilistic aggregation using the AHP method partially to determine the correlations among projects. To implement the methodology and run a real data case study a system was created. The numerical results proved the necessity of identifying the correlations among projects and the impacts of the portfolio effect in probabilistic aggregation.

## Keywords

Reserves estimation; economic assessment; probabilistic aggregation; correlations; petroleum.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>15</b>
2.1. Termos Básicos da Indústria de Petróleo	15
2.2. Classificação e Categorização de Recursos	20
2.3. Estimativa de Volumes Recuperáveis	23
2.3.1. Filosofia Baseada em Risco - Abordagem Incremental	24
2.3.2. Filosofia Baseada em Incerteza - Abordagem Cumulativa	25
2.4. Avaliação Econômica	26
2.5. Agregação de Reservas	28
2.5.1. Método Determinístico	28
2.5.2. Métodos Probabilísticos	29
2.5.3. Correlações entre Entidades de Reservas	37
2.6. Considerações Finais	40
<b>3 Metodologia para Avaliação Probabilística de Reservas</b>	<b>42</b>
3.1. Etapas da Metodologia	42
3.1.1. Seleção das Entidades de Reservas	44
3.1.2. Avaliação Econômica	45
3.1.3. Agregação de Reservas	45
3.2. Estudo de Caso e Sistema	46
3.3. Seleção dos Projetos	47
3.4. Considerações Finais	49
<b>4 Avaliação Econômica</b>	<b>51</b>
4.1. Avaliação Econômica Probabilística	51
4.1.1. Ferramenta Aprova-Econ	52
4.1.2. Estudo de Caso	56
4.2. Avaliação Econômica Determinística	58
4.3. Geração das Curvas Probabilísticas de Reservas	59
4.4. Considerações Finais	60
<b>5 Agregação das Reservas das Entidades</b>	<b>61</b>
5.1. Metodologia de Agregação Probabilística	61
5.1.1. Montagem da Hierarquia AHP	62
5.1.2. Aplicação da Hierarquia AHP para a Determinação das Correlações entre Entidades	65
5.1.3. Agregação através da Simulação	66
5.2. Metodologia de Agregação Determinística	68
5.3. Ferramentas Aprova-Correl e Aprova-Econ	68
5.4. Estudo de Caso	71
5.4.1. Resultados	74
5.5. Considerações Finais	78
<b>6 Conclusões e Recomendações</b>	<b>79</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>82</b>
<b>Apêndice I – Comparação entre os Softwares @Risk e Crystal Ball</b>	<b>85</b>
<b>Apêndice II – Truncamento das Distribuições</b>	<b>89</b>

<b>Apêndice III – Estimação de Mínimos e Máximos das Curvas de Reservas</b>	<b>94</b>
<b>Apêndice IV – Cálculo do Vetor de Influência dos Fatores e da Taxa de Consistência</b>	<b>96</b>
Vetor de Influência dos Fatores	96
Taxa de Consistência	96
<b>Apêndice V – Análise de Consistência Lógica da Matriz de Correlações</b>	<b>99</b>
<b>Apêndice VI – Teste Kappa</b>	<b>100</b>



## Lista de Figuras

Figura 1: Previsão de Matriz Energética Mundial até 2030 (Fonte: Exxon Mobil, 2009).....	16
Figura 2: Previsão de Investimentos da Petrobras por Segmento de Negócio (Fonte: Petrobras, 2010).....	18
Figura 3: Representação Gráfica da Classificação de Recursos (Fonte: Adaptado de SPE-PRMS, 2007) .....	20
Figura 4: Representação da Abordagem Incremental.....	24
Figura 5: Quantificação de Incerteza (Fonte: Adaptado de Etherington, 2009).....	26
Figura 6: Efeito Portfólio da Agregação Probabilística (Fonte: Adaptado de Etherington et al., 2001) .....	30
Figura 7: Método de Monte Carlo com Ocorrência de <i>Clustering</i> .....	33
Figura 8: Método de Hipercubo Latino .....	33
Figura 9: Árvore de Decisão para Baixa Correlação (Fonte: Swinkles, 2001) ....	36
Figura 10: Árvore de Decisão para Alta Correlação (Fonte: Swinkles, 2001) .....	37
Figura 11: Comparação entre Agregação Determinística e Probabilística com Diferentes Tratamentos de Correlações (Fonte: Carter e Morales, 1998)...	38
Figura 12: Esquema das Etapas da Metodologia Aprova .....	43
Figura 13: Arquitetura Geral do Sistema Aprova.....	47
Figura 14: Entrada de Dados Mais Prováveis do Fluxo de Caixa Probabilístico na Ferramenta Aprova-Econ .....	53
Figura 15: Atribuição de Incertezas aos Componentes do Fluxo de Caixa Probabilístico na Ferramenta Aprova-Econ.....	53
Figura 16: Distribuição de Probabilidade para o Componente Custo Operacional Variável no Ano de 2011 .....	54
Figura 17: Intervalo de Amostragem Equivalente ao Cenário de Produção P90 para o Componente Custo Operacional Variável.....	55
Figura 18: Distribuição de Probabilidade do Fluxo de Caixa P90 do Ano de 2011 na Ferramenta Aprova-Econ .....	55
Figura 19: Exemplo da Geração de Curva de Reservas Acumulada Descendente.....	59
Figura 20: Esquema da Avaliação Probabilística Econômica .....	60
Figura 21: Exemplos de Decomposição Hierárquica do Objetivo Correlação.....	63

Figura 22: Avaliação das Correlações por um Único Examinador .....	66
Figura 23: Esquema da Etapa de Agregação Probabilística .....	67
Figura 24: Fluxo de Informações do Sistema Aprova.....	68
Figura 26: Curva Probabilística de Reservas Consolidada dos Projetos Probabilísticos na Ferramenta Aprova-Agreg.....	70
Figura 27: Interface de Resultado das Reservas Agregadas na Ferramenta Aprova-Agreg.....	71
Figura 28: Hierarquia dos Fatores que Influenciam a Correlação entre Projetos.....	72
Figura 29: Curva Resultante da Agregação de Reservas dos Projetos Probabilísticos com Correlações Nulas .....	75
Figura 30: Curva Resultante da Agregação de Reservas dos Projetos Probabilísticos com Correlações Identificadas .....	76
Figura 31: Curva Resultante da Agregação de Reservas dos Projetos Probabilísticos com Correlações Totais .....	77
Figura 32: Distribuição de Probabilidade do Componente Custo Variável.....	89
Figura 33: Distribuição de Probabilidade do Componente Custo Variável Truncada para um Cenário de Baixa Produção .....	90
Figura 34: Distribuição de Probabilidade do Componente Custo Variável Truncada para um Cenário de Média Produção.....	91
Figura 35: Distribuição de Probabilidade do Componente Custo Variável Truncada para um Cenário de Alta Produção .....	91
Figura 36: Estimação das Inclinações da Curva de Reservas .....	94
Figura 37: Teste de Consistência do @Risk .....	99
Figura 38: Divergência na Análise Individual de Dois Examinadores no Fator Geologia .....	100

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Terminologia Recomendada pelo SPE-PRMS (Fonte: Adaptado de SPE-PRMS, 2007).....	22
Tabela 2: Dados de Produção dos Projetos do Campo Teste .....	48
Tabela 3: Análise da Variância dos Projetos do Campo Teste .....	49
Tabela 4: Resultados de Anos de Corte e Reservas de Óleo e de Gás dos Projetos Probabilísticos do Campo Teste.....	57
Tabela 5: Resultados de Anos de Corte e Reservas de Óleo e de Gás dos Projetos Determinísticos do Campo Teste .....	58
Tabela 6: Escala de Importância de Saaty (1991).....	63
Tabela 7: Exemplo de Aplicação do Cálculo dos Pesos Relativos.....	64
Tabela 8: Escala Qualitativa Genérica .....	65
Tabela 9: Exemplo de Escala Quantitativa para o Fator Distância .....	65
Tabela 10: Matrizes de Correlações entre Projetos por Fator.....	73
Tabela 11: Matriz Final de Correlações entre Projetos .....	73
Tabela 12: Reservas dos Projetos Agregados Deterministicamente .....	74
Tabela 13: Reservas dos Projetos Agregados Probabilisticamente com Correlações Nulas .....	75
Tabela 14: Reservas dos Projetos Agregados Probabilisticamente com Correlações Identificadas .....	76
Tabela 15: Reservas dos Projetos Agregados Probabilisticamente com Correlações Totais.....	77
Tabela 16: Resultados Consolidados dos Cenários de Agregação .....	78
Tabela 17: Avaliação de Aspectos Gerais.....	86
Tabela 18: Avaliação de Recursos e Restrições na Modelagem .....	87
Tabela 19: Avaliação de Recursos de Simulação .....	87
Tabela 20: Avaliação da Informação Contida nos Resultados .....	88
Tabela 21: Tabela de Consistência de Julgamentos Aleatórios.....	98
Tabela 22: Pesos $w_{ij}$ para Diferentes Categorias de Concordância .....	101
Tabela 23: Escala do Índice Kappa Ponderado .....	102